

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт математики и фундаментальной информатики
Базовая кафедра вычислительных и информационных технологий

УТВЕРЖДАЮ
/Заведующий кафедрой
В.В. Шайдулов / В.В. Шайдулов

«16» июня 2016 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УПРУГИХ
ВОЛН В БЛОЧНЫХ СРЕДАХ С ПРОСЛОЙКАМИ

Направление 02.04.01 Математика и компьютерные науки

Магистерская программа 02.04.01.02 Вычислительная математика

Научный руководитель *
кандидат физико-математических наук

М.П. Варыгина / М.П. Варыгина
16.06.2016

Выпускник

М.Е. Бадын-оол / М.Е. Бадын-оол
16.06.2016

Красноярск 2016

АННОТАЦИЯ

Цель работы – разработка комплекса программ для расчета упругих волн в блочной среде.

В работе исследована математическая модель упругой среды, описывающая блочную структуру, построен алгоритм решения двумерной задачи теории упругости. Разработаны вычислительные алгоритмы для численного моделирования упругих волн в блочных средах. На основе этих алгоритмов реализован программный комплекс, состоящий из вычислительной программы и интерфейса, а также подключен графический редактор для построения результатов расчетов.

Магистерская диссертация по теме «Реализация программного комплекса для численного моделирования процессов распространения упругих волн в блочных средах с прослойками» содержит 25 страниц текста, 2 приложения, 13 использованных источников.

Ключевые слова: Теория упругости, упругие волны, блочная среда, вычислительный алгоритм, программный комплекс, пользовательский интерфейс.

ABSTRACT

The purpose of study is development of a complex program for the calculation of elastic waves in block medium.

In this paper, we investigate the mathematical model of elastic medium, which describes the block structure. The algorithm of the solution of the two-dimensional task on distribution of elastic waves in the block medium is offered. Developed computational algorithms for numerical modeling of elastic waves in block medium. On the basis of these algorithms is implemented software complex consisting of the computer program and the interface and also connected graphics editor for plotting the results of calculations.

The master thesis entitled "Implementation of software for the numerical modeling of elastic wave propagation in block medium with layers" contains the 25 pages of text, the 2 applications, the 13 used sources.

The keywords: Theory of elasticity, elastic waves, block medium, computational algorithms, software, user interface.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
1. Математическая модель	6
2. Алгоритм решения.....	8
3. Программный комплекс	11
3.1 Вычислительная программа	12
3.2 Интерфейс	14
3.3 Взаимодействие интерфейса и вычислительной программы	17
4. Численные расчеты.....	21
Заключение	25
Список использованных источников	26
Приложение А Описание переменных	27
Приложение Б Вывод в интерфейс результата расчета задачи.....	28

ВВЕДЕНИЕ

Задачи о распространении упругих волн широко используются в разных областях, например, в сейсмологии (для регистрации землетрясений), геологии (сейсморазведка). Для численного моделирования упругих волн разрабатываются вычислительные алгоритмы, поскольку это позволяет получить решение достаточно трудоемких задач теории упругости.

На сегодняшний день существуют вычислительные алгоритмы, позволяющие получать численное решение таких задач. Однако программы, реализованные на этих алгоритмах, могут представлять определенные трудности и неудобства для пользователей, не являющихся разработчиками данного программного обеспечения. Этот факт привел к постановке задачи о реализации эффективного программного комплекса, решающего задачу о распространении упругой волны в блочной среде и обладающего универсальностью. Выбор блочной среды обуславливается тем, что многие природные материалы имеют ярко выраженное структурно-неоднородное блочно-иерархическое строение: блоки связаны друг с другом прослойками породы с существенно более слабыми механическими свойствами. В рамках данного программного обеспечения необходимо разработать интерфейс, предоставляющий возможность пользователям изменять входные данные, не затрагивая исходный код программы, работать с данными интерактивно – изменять параметры непосредственно на форме интерфейса и видеть полученные в ходе расчетов результаты.

Объектом исследования являются процессы распространения упругих волн в блочных средах.

Целью магистерской диссертационной работы является разработка вычислительных алгоритмов и программного комплекса для численного решения задач, описывающих динамическое взаимодействие блоков и прослоек.

Для достижения поставленной цели выделены следующие задачи:

- исследование математической модели блочной среды;
- построение алгоритма решения задачи;
- реализация вычислительных алгоритмов на базе C++;
- изучение и анализ средств реализации пользовательских интерфейсов;
- создание графического интерфейса для вычислительной программы;
- обеспечение взаимодействия программы и интерфейса.

В качестве метода исследования используется вычислительный эксперимент, включающее в себя следующие этапы: построение математической модели блочной среды, построение численного алгоритма решения, программная реализация алгоритма, проведение расчетов и анализ полученных результатов.

Вспомогательным средством для реализации программного комплекса является статья [1], в которой разработан вычислительный алгоритм для расчета одномерных задач о распространении упругой волны в слоистой среде.

Практическая ценность работы состоит в создании комплекса программ, который позволяет непосредственно в форме интерфейса отображать результаты численного решения задачи о распространении упругих волн в блочных средах с упругими прослойками, а также может быть использован в учебном процессе при подготовке специалистов математических, физических, инженерных специальностей в качестве обучающего интерактивного пособия.

По теме магистерской диссертации опубликовано 2 статьи:

1. Бадын-оол М.Е. О проектировании и способах организации интерфейса. // «Роль инноваций в трансформации современной науки». 2016. №3. С. 3-5.
2. Бадын-оол М.Е. Интерфейс для комплекса программ по расчету задач теории упругости. // «Новая наука: стратегии и вектор развития». 2016. №2. С. 59-62.

Во введении кратко описан объект исследования, сформулирована цель магистерской диссертационной работы, а также выделены её задачи. Обоснованы актуальные на сегодняшний день вопросы исследования. Перечислены основные публикации по теме работы и дана общая характеристика магистерской диссертации.

В первой главе рассмотрена математическая модель двумерных уравнений теории упругости блочной структуры среды для основного слоя и прослойки.

Вторая глава содержит описание алгоритма решения двумерной задачи с помощью метода расщепления и схемы распада разрыва Годунова.

В третьей главе рассмотрен программный комплекс. Здесь описана вычислительная программа, решающая задачу теории упругости, интерфейс для наглядного представления данных, а также его взаимодействие с программой.

В четвертой главе приведены численные результаты решения задач о распространении упругих волн в однородных и блочных средах под воздействием различных нагрузок.

В заключении дано краткое обобщение полученных результатов. Показано, что намеченные задачи решены и поставленная цель достигнута. Приведен список используемых источников.

1. Математическая модель

Рассмотрим условную схему блочного строения среды с инвариантным отношением характерных масштабов блоков и прослоек (рис. 1). Структура среды представляет собой чередующуюся систему из n упругих блоков толщины h_1 в направлении x_1 (m упругих слоев толщины h_2 в направлении x_2) и упругих прослоек толщины h_0 ($h_0 \ll h_1, h_0 \ll h_2$).

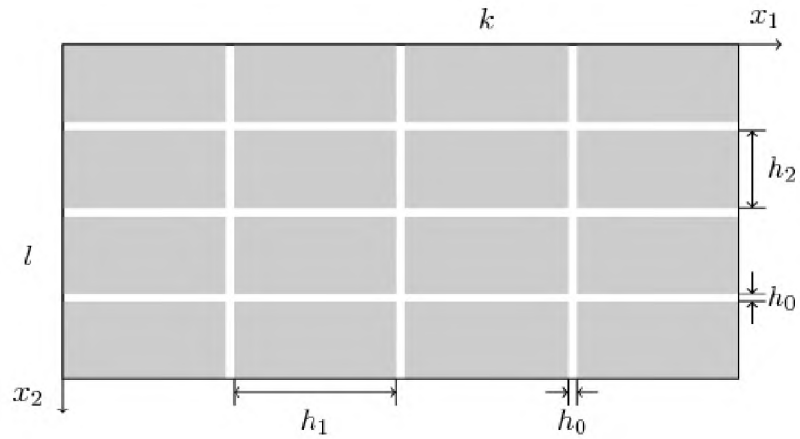


Рисунок 1 - Блочная структура среды

Внутри блока с номером (k, l) выполняются двумерные уравнения теории упругости [6]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_1^{kl}}{\partial t} &= \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_{11}^{kl}}{\partial x_1} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_{12}^{kl}}{\partial x_2}, & \frac{\partial v_2^{kl}}{\partial t} &= \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_{12}^{kl}}{\partial x_1} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_{22}^{kl}}{\partial x_2}, \\ \frac{\partial \sigma_{11}^{kl}}{\partial t} &= (\lambda + 2\mu) \frac{\partial v_1^{kl}}{\partial x_1} + \lambda \frac{\partial v_2^{kl}}{\partial x_2}, & \frac{\partial \sigma_{22}^{kl}}{\partial t} &= \lambda \frac{\partial v_1^{kl}}{\partial x_1} + (\lambda + 2\mu) \frac{\partial v_2^{kl}}{\partial x_2}, \\ \frac{\partial \sigma_{12}^{kl}}{\partial t} &= \mu \frac{\partial v_2^{kl}}{\partial x_1} + \mu \frac{\partial v_1^{kl}}{\partial x_2}, & \frac{\partial \sigma_{33}^{kl}}{\partial t} &= \lambda \left(\frac{\partial v_1^{kl}}{\partial x_1} + \frac{\partial v_2^{kl}}{\partial x_2} \right). \end{aligned} \quad (1)$$

заданные относительно вектора скорости v с компонентами v_1 и v_2 и тензора напряжения σ с компонентами $\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{12}, \sigma_{33}$ [9]. Константы λ и μ – параметры Ламе, ρ – плотность среды. Скорости распространения продольных волн c_p и поперечных волн c_s в среде имеют вид $c_p = \sqrt{(\lambda + 2\mu) / \rho}$, $c_s = \sqrt{\mu / \rho}$.

Поведение материала прослойки описывается с помощью системы дифференциальных уравнений, учитывающей инерционные свойства прослойки:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial}{\partial t} \frac{v_1^{k+1,l} + v_1^{kl}}{2} &= \frac{1}{\rho_0} \frac{\sigma_{11}^{k+1,l} - \sigma_{11}^{kl}}{h_0}, \quad \frac{\partial}{\partial t} \frac{\sigma_{11}^{k+1,l} + \sigma_{11}^{kl}}{2} = (\lambda_0 + 2\mu_0) \frac{v_1^{k+1,l} + v_1^{kl}}{h_0}, \\
\frac{\partial}{\partial t} \frac{v_2^{k+1,l} + v_2^{kl}}{2} &= \frac{1}{\rho_0} \frac{\sigma_{22}^{k+1,l} - \sigma_{22}^{kl}}{h_0}, \quad \frac{\partial}{\partial t} \frac{\sigma_{22}^{k+1,l} + \sigma_{22}^{kl}}{2} = (\lambda_0 + 2\mu_0) \frac{v_2^{k+1,l} + v_2^{kl}}{h_0}, \\
\frac{\partial}{\partial t} \frac{v_1^{k,l+1} + v_1^{kl}}{2} &= \frac{1}{\rho_0} \frac{\sigma_{12}^{k,l+1} - \sigma_{12}^{kl}}{h_0}, \quad \frac{\partial}{\partial t} \frac{\sigma_{12}^{k,l+1} + \sigma_{12}^{kl}}{2} = \mu_0 \frac{v_1^{k,l+1} - v_1^{kl}}{h_0}, \\
\frac{\partial}{\partial t} \frac{v_2^{k+1,l} + v_2^{kl}}{2} &= \frac{1}{\rho_0} \frac{\sigma_{12}^{k+1,l} - \sigma_{12}^{kl}}{h_0}, \quad \frac{\partial}{\partial t} \frac{\sigma_{12}^{k+1,l} + \sigma_{12}^{kl}}{2} = \mu_0 \frac{v_2^{k+1,l} - v_2^{kl}}{h_0}.
\end{aligned} \tag{2}$$

где λ_0, μ_0, ρ_0 – соответствующие параметры материала прослойки. Скорости распространения продольных волн c_{p0} и поперечных волн c_{s0} в прослойке – $c_{p0} = \sqrt{(\lambda_0 + 2\mu_0) / \rho_0}$, $c_{s0} = \sqrt{\mu_0 / \rho_0}$. В эту систему входят граничные значения введенных выше скоростей и напряжений: левые для k -го слоя и правые для $(k+1)$ -го слоя; нижние для l -го слоя и верхние для $(l+1)$ -го слоя. Такая система может быть получена методом осреднения уравнений теории упругости в приближении тонкой прослойки ($h_0 \ll h_1, h_0 \ll h_2$).

Система уравнений (1), (2) дополняется нулевыми начальными данными. Граничные условия могут быть заданы в терминах скоростей или напряжений на одной из граней:

$$\begin{aligned}
v_1 &= v_1^0, \quad v_2 = v_2^0, \\
n_1 \sigma_{11} + n_2 \sigma_{12} &= p_1, \\
n_1 \sigma_{12} + n_2 \sigma_{22} &= p_2.
\end{aligned}$$

2. Алгоритм решения

Численное решение двумерной задачи строилось на основе метода двуциклического расщепления по пространственным переменным [8] в сочетании с монотонным методом Годунова типа «предиктор-корректор» первого порядка точности [3].

Метод расщепления для решения данной задачи происходит в четыре этапа:

1. Решается одномерная задача в промежутке времени $(t; t + \tau / 2)$ в направлении x_1 .
2. Аналогично первому этапу в направлении x_2 .
3. Повторный пересчет задачи в промежутке времени $(t + \tau / 2; t + \tau)$ в направлении x_2 .
4. Аналогично третьему этапу в направлении x_1 .

Метод двуциклического расщепления обеспечивает устойчивость численного решения в двумерном случае при выполнении условия Куранта–Фридрихса–Леви в одномерных схемах.

Процедура расщепления приводит к следующим одномерным системам уравнений:

Расщепление по x_1 :

$$\frac{\partial v_1^{kl}}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_{11}^{kl}}{\partial x_1}, \quad \frac{\partial \sigma_{11}^{kl}}{\partial t} = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial v_1^{kl}}{\partial x_1},$$

$$\frac{\partial v_2^{kl}}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_{12}^{kl}}{\partial x_1}, \quad \frac{\partial \sigma_{12}^{kl}}{\partial t} = \mu \frac{\partial v_2^{kl}}{\partial x_1},$$

$$\frac{\partial \sigma_{22}^{kl}}{\partial t} = \lambda \frac{\partial v_1^{kl}}{\partial x_1}, \quad \frac{\partial \sigma_{33}^{kl}}{\partial t} = \lambda \frac{\partial v_1^{kl}}{\partial x_1},$$

Расщепление по x_2 :

$$\frac{\partial v_2^{kl}}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_{22}^{kl}}{\partial x_2}, \quad \frac{\partial \sigma_{22}^{kl}}{\partial t} = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial v_2^{kl}}{\partial x_2}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial v_1^{kl}}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_{12}^{kl}}{\partial x_2}, \quad \frac{\partial \sigma_{12}^{kl}}{\partial t} = \mu \frac{\partial v_1^{kl}}{\partial x_2}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \sigma_{11}^{kl}}{\partial t} = \lambda \frac{\partial v_2^{kl}}{\partial x_2}, \quad \frac{\partial \sigma_{33}^{kl}}{\partial t} = \lambda \frac{\partial v_2^{kl}}{\partial x_2}. \quad (5)$$

Численное решение одномерных задач строилось на основе схемы распада разрыва Годунова на равномерной сетке с выбором предельно допустимого по

условию Куранта–Фридрихса–Леви шага по времени $\tau = \min(\Delta x_1 / c_p, \Delta x_2 / c_p)$, Δx_i – шаг сетки в направлении x_i ($i = 1, 2$).

Метод «предиктор-корректор» можно описать следующим образом. Расчет шага, т. е. переход от состояния на момент t к состоянию на момент $t + \tau$, разбивается на два этапа: вычисление вспомогательных («больших») величин на «промежуточном» слое, определяемых из распадов разрывов («счет») и затем вычисление величин на верхнем слое с соблюдением законов сохранения в разностной форме («пересчет»).

Условия согласования на границах раздела слоев и прослоек в форме системы уравнения (1), (2) также рассчитывались по схеме Годунова. Для этого в каждой из искусственно введенных ячеек длины h_0 , имитирующих отдельную прослойку, была реализована схема распада разрыва с независимым шагом по времени $\tau_0 = h_0 / c_{p0}$, $\tau_0 \ll \tau$. Шаг τ_0 является предельным по условию Куранта–Фридрихса–Леви для материала прослойки.

В прослойках производился расчет такого количества шагов по времени, которое необходимо для достижения очередного временного слоя $t + \tau$ основной схемы. Сеточно-характеристическая интерпретация применяемого метода схематически приведена на рис. 2 [7].

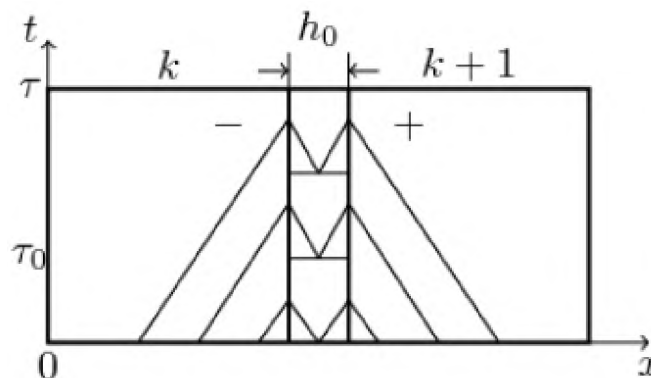


Рисунок 2 - Сеточно-характеристическая схема со сбалансированными шагами по времени

На этапе решения системы (2) с шагом τ_0 использовались уравнения распада разрыва на границах раздела сред («предиктор» схемы в прослойке):

$$\begin{aligned} z_0 v_+ - \sigma_+ &= z_0 v - \sigma, & z v_+ + \sigma_+ &= z v^{k+1} - \sigma^{k+1}, \\ z_0 v_- + \sigma_- &= z_0 v + \sigma, & z v_- - \sigma_- &= z v^k - \sigma^k. \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь $z = \rho c$ и $z_0 = \rho_0 c_0$ – акустические импедансы материалов основного слоя и прослойки, величины с верхними индексами относятся к приграничным ячейкам взаимодействующих слоев, с нижним индексом “+” – к правой, а с индексом “–” – к левой границе прослойки. Последующий пересчет решения («корректор» схемы) производился по формулам

$$\hat{v} = v + (\sigma_+ - \sigma_-) \frac{\tau_0}{\rho_0 \delta}, \quad \hat{\sigma} = \sigma + (v_+ - v_-) \frac{\tau_0}{a_0 \delta}. \quad (7)$$

в которых величины с крышкой относятся к новому временному слою. Предикторные значения сеточных величин основной схемы с шагом τ на границах слоев вычислялись путем осреднения значений, относящихся к границам ячеек на мелких шагах. «Корректор» основной схемы в слоях выполнялся обычным способом на основе интегральных аналогов дифференциальных уравнений

$$\rho_0 \frac{d}{dt} \frac{v^{k+1} + v^k}{2} = \frac{\sigma^{k+1} - \sigma^k}{\delta}, \quad a_0 \frac{d}{dt} \frac{\sigma^{k+1} + \sigma^k}{2} = \frac{v^{k+1} - v^k}{\delta}.$$

3. Программный комплекс

В данной работе программный комплекс реализуется путем организации трехслойной архитектуры. Он состоит из следующих уровней: 1) интерфейс пользователя, 2) вычислительный слой, 3) слой-посредник (веб-сервер) (рис.3).

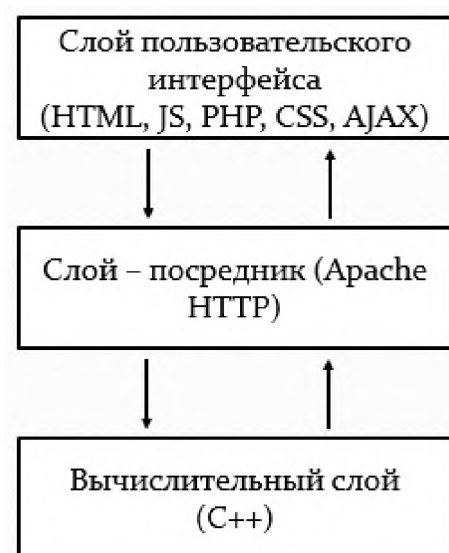


Рисунок 3 - Архитектура программного комплекса

Пользовательский интерфейс основан на таких языках программирования, как HTML [5], Javascript [10], PHP [4], AJAX и CSS. Javascript используется для придания интерактивности веб-интерфейсу, а также для получения данных, введенных пользователем. PHP является серверной частью интерфейса, которая обеспечивает взаимодействие веб-приложения и вычислительной программы. AJAX выступает в качестве «транспортного» средства между Javascript и PHP, он позволяет в фоновом режиме (без перезагрузки всей страницы) обмениваться данными между браузером и сервером.

Вычислительный слой базируется на численных алгоритмах и исходном коде программы C++ [2].

«Посредником» между пользовательским и вычислительным слоями выступает веб-сервер Apache.

Для визуализации результатов решенных задач выбран графический редактор Gnuplot [11], поскольку он является бесплатным программным обеспечением, а также может выполнять скрипты, читаемые из файлов.

Более детальное описание всех трех составляющих программного комплекса будет дано ниже.

3.1 Вычислительная программа

В состав программы входят: исполняемый файл «2-dimensionalCase.exe», текстовый файл с исходными данными «parameter.txt». Программа реализована на языке C++ на платформе Microsoft Visual Studio 2013. Исходный код программы находится в файле «Исходный код.cpp».

Структура программы

Программа состоит из следующих функций:

- *main (int argc, char **argv)* – осуществляется считывание данных из файла, а также инициализация программных переменных.
- *Igdbl_cpu()* – расчет переменных, вызов процедур расщепления;
- *decompX (int fl, int it, double * v1, double * v2, double * s1, double * s2, double * s3, double * V1, double * V2, double * S1, double * S3)* – для реализации расщепления по x ;
- *decompY (int fl, int it, double * v1, double * v2, double * s1, double * s2, double * s3, double * V1, double * V2, double * S2, double * S3)* – для реализации расщепления по y ;
- *predictor (int dir, int kind, double * v, double * s, double * V, double * S)* – для реализации этапа «предиктор» основного слоя в одномерных задачах;
- *layer (int dir, int kind, double * v, double * s, double * V, double * S)* – выполнение этапа «предиктор» для решения уравнений в прослойках;

- *layer_lam (int dir, double * V, double * s)* – выполнение этапа «корректор» для решения уравнений в прослойках;
- *boundary (int dir, int kind, int nzero, double * v, double *s, double * V, double * S, int it)* – для задания граничных условий;
- *h_bc (int id, double t)* – для расчета краевых условий;
- *corrector (int dir, int kind, double * v, double * s, double * V, double * S)* – для реализации этапа «корректор» основного слоя в одномерных задачах;
- *corrector_lam (int dir, double * V, double * s)* – для расчета напряжений в задачах (5);
- *PlotGNU (double* data, const char nstr[], int Nx, int Nl1, int Ny, int Nl2, double hx, double hy)* – для формирования выходных файлов в среде Gnuplot;

Входные данные

Параметры, записанные в файле «parameter.txt», являются входными данными, на основании которых программа выполняет необходимые расчеты. Каждой строке текстового файла соответствует конкретная переменная, объявленная в программе. Список переменных приведен в Приложении А.

Описание алгоритма

1. Выполняется построчное считывание данных из текстового файла и присвоение считываемых значений переменным;
2. Осуществляется цикл по времени. На каждом временном шаге выполняются этапы метода расщепления: расщепление по x_1 , x_2 с временным шагом $\tau / 2$; расщепление по x_2 , x_1 с временным шагом τ . Для каждого из этих четырех этапов последовательно выполняются следующие пункты:

2.1 Реализация этапа «предиктор». Вычисление вспомогательных величин в узлах сетки на «промежуточном» слое, определяемых из распадов

разрывов в слое. После чего выполняется предиктор для прослойки, для определения скоростей.

2.2 Реализация этапа «корректор» для прослойки для расчета напряжения путем вычисления величин на верхнем слое.

2.3 Осуществляется проверка, заданы ли условия на границе. Если условия заданы, то производится расчет краевых условий;

2.4 Реализация этапа «корректор» для основного слоя;

2.5 Рассчитываются напряжения в задачах (5) при помощи значений скоростей;

3. Вызов процедуры PlotGnu, генерация выходных файлов.

Выходные данные

Выходными данными программы являются файлы, на основании которых средой Gnuplot строятся пять графических файлов, выступающих в качестве графического решения. Созданные файлы соответствуют скоростям V_1 , V_2 и напряжениям S_1 , S_2 , S_3 , где $S_1 = \sigma_{11}$, $S_2 = \sigma_{22}$, $S_3 = \sigma_{12}$.

3.2 Интерфейс

Поскольку целью работы является разработка программного комплекса, обеспечивающего наглядное и понятное представление данных для пользователя, рассмотрим интерфейсную часть.

Введем понятие пользовательского интерфейса. Пользовательский интерфейс – это набор приемов взаимодействия пользователя с программой.

В ходе работы были рассмотрены следующие типы пользовательских интерфейсов:

- консольное приложение, ввод и вывод информации в котором производится в специальном окне, представляющем собой аналог командной строки, где виден процесс выполнения программы;

- оконный интерфейс, в полной мере использующее элементы графического интерфейса (кнопки, поля ввода, меню и т.д.);
- веб-ориентированный интерфейс (веб-интерфес), позволяющий пользователю взаимодействовать с приложением через веб-браузер, который как и оконное приложение, содержит элементы графического интерфейса.

Преимущества и недостатки рассмотренных типов интерфейсов приведены в табл.1.

Таблица 1 - Анализ типов интерфейсов

Интерфейс Критерий	Консольный интерфейс	Оконный интерфейс	Веб-интерфейс
Удобство использования	—	+	+
Кроссплатформенность	—	—	+
Удобство запуска программ	—	—	+
Доступность без интернет-соединения	+	+	—

Исходя из результатов проведенного анализа был выбран веб-интерфейс, поскольку он удовлетворяет требованию о наглядности данных. Также он является более удобным в плане взаимодействия пользователя с приложением по сравнению с консольным интерфейсом, который предполагает наличие некоторой подготовки и знание определенных команд, и не требует установки, которая необходима в случае оконного интерфейса. Еще одним немаловажным преимуществом является кроссплатформенность – способность программного обеспечения функционировать в нескольких различных операционных системах или на разных аппаратных платформах.

Таким образом, было решено, что наиболее оптимальный вариант – это разработать некоторый веб-интерфейс, который был бы связан с вычислительной программой и графической средой Gnuplot.

Для решения данной задачи возник вопрос о выборе средств реализации. Поскольку был выбран веб-интерфейс, то для его функционирования необходим некоторый веб-сервер, на основе которого он будет реализован. При рассмотрении рейтинга веб-серверов был выбран сервер Apache, поскольку он является свободным программным обеспечением и наиболее распространенным в мире [13] (рис.4).

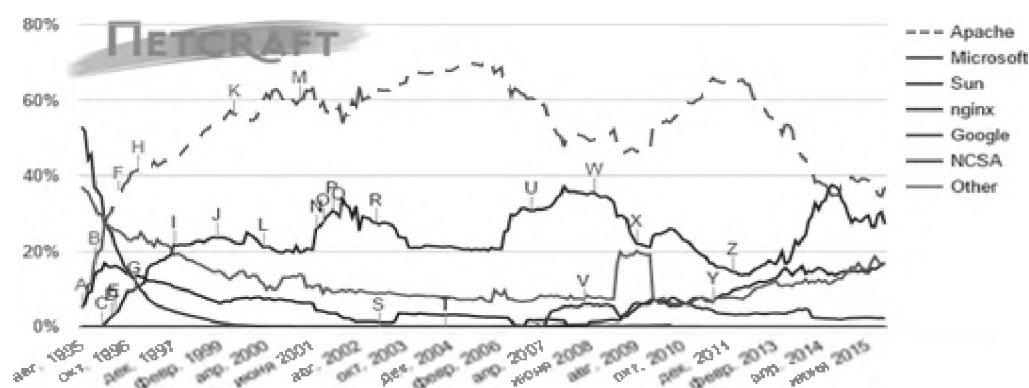


Рисунок 4 - Рейтинг веб-серверов

В ходе работы был создан веб-интерфейс для двумерной задачи [12], который выглядит следующим образом (рис.5):

Основные параметры		Начальные условия		Параметры материала	
<p>Количество блоков по "x" <input type="text" value="1"/></p> <p>Количество блоков по "y" <input type="text" value="1"/></p> <p>Размерность пространства по "x" <input type="text" value="256"/></p> <p>Размерность пространства по "y" <input type="text" value="256"/></p> <p>Число шагов по времени: <input type="text" value="200"/></p> <p>Длина блока <input type="text" value="10000000000"/></p> <p>Ширина блока <input type="text" value="10000000000"/></p> <p>Параметр Куранта <input type="text" value="1"/></p> <p><input type="button" value="Нарисовать область"/></p>		<p>при $t = 0$</p> <p>σ_{11} <input type="text" value="0"/> v_1 <input type="text" value="0"/></p> <p>σ_{22} <input type="text" value="0"/> v_2 <input type="text" value="0"/></p> <p>σ_{12} <input type="text" value="0"/></p> <p>Крайевые условия</p> <p>Тип граничных условий:</p> <ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="radio"/> Lambda-impulse <input type="radio"/> P-impulse <input type="radio"/> Sin <input type="radio"/> Lamb <p>Число импульсов <input type="text" value="5"/></p> <p>Длительность импульса <input type="text" value="1.5e-5"/></p> <p>Интервал между импульсами <input type="text" value="1.5e-5"/></p>		<p>Основной:</p> <p>Плотность <input type="text" value="2600"/></p> <p>Продольная скорость <input type="text" value="3500"/></p> <p>Поперечная скорость <input type="text" value="1000"/></p> <p>Простойка:</p> <p>Плотность <input type="text" value="1000"/></p> <p>Продольная скорость <input type="text" value="1000"/></p> <p>Поперечная скорость <input type="text" value="750"/></p>	
<p><input type="button" value="Задать граничные условия"/></p> <p>• Скорость v_2</p> <p>• Напряжение</p> <p>Значение <input type="text" value="1e1"/></p>		<p>Результат расчета</p>			
<p><input type="button" value="Задать граничные условия"/></p>		<p><input type="button" value="Задать граничные условия"/></p> <p>• Скорость v_1</p> <p>• Напряжение</p> <p>• σ_{11}</p> <p>• σ_{12}</p> <p>Амплитуда <input type="text" value="1e1"/></p> <p>Нижняя граница приложения нагрузки <input type="text" value="0"/></p> <p>Верхняя граница приложения нагрузки <input type="text" value="256"/></p>			
<p><input type="button" value="Задать граничные условия"/></p>					

Рисунок 5 - Интерфейс для двумерной задачи теории упругости

В левом верхнем блоке задаются основные параметры задачи: количество блоков по x и y , размерность сетки в блоке по x и y , число шагов по времени, размер блока (длина и ширина), параметр Куранта. Также есть возможность нарисовать область для наглядности, которая отображается в левом нижнем блоке.

В блоке «Начальные условия» можно задать отличные от нулевых условий значения скоростей и напряжений.

В блоке «Краевые условия» есть возможность выбрать тип граничных условий: Λ -образная, P_i -образная импульсные нагрузки, периодическая нагрузка. Для импульсных нагрузок задаются число импульсов, длительность, и интервал между импульсами, если число импульсов больше единицы. Для периодической нагрузки задается частота колебаний.

В правом верхнем блоке задаются параметры материала для основного слоя и для прослойки такие как плотность, продольная и поперечная скорости.

В левом нижнем блоке задаются граничные условия – скорости или напряжения, а также амплитуда и зона приложения нагрузки для силовых условий.

В правом нижнем блоке отображаются результаты расчетов с возможностью выбора визуализации полей скоростей и напряжений. Кнопки выбора становятся доступными после обработки данных, когда получены результаты расчета программы.

3.3 Взаимодействие интерфейса и вычислительной программы

При организации веб-интерфейса была спроектирована следующая схема движения данных, представленная на рис.6.

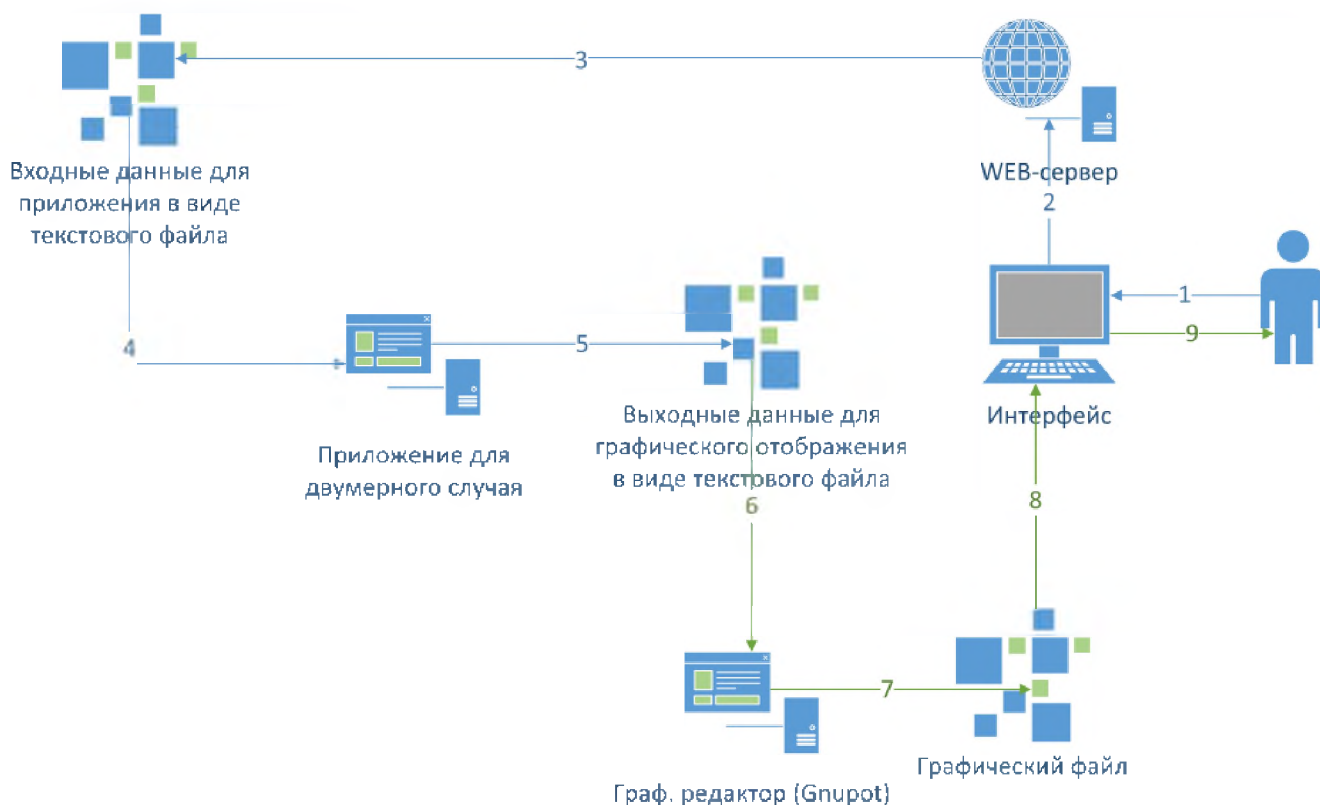


Рисунок 6 - Схема движения данных

Рассмотрим данную схему. При нажатии на кнопку «Рассчитать» на форме интерфейса (1) значения полей и элементов, введенные пользователем, записываются в текстовый файл и обрабатываются веб-сервером (2), после чего передаются в виде текстового файла (3) в приложение (4), которое запускается (компилируется) веб-сервером. Компиляция приложения выполняется путем запуска командного файла из php-скрипта, в свою очередь выполняющего запуск исполняемого файла программы C++. После получения данных приложение производит вычисления и выдает результат (5), который в дальнейшем обрабатывается графическим редактором (6). Он в свою очередь предоставляет графическое представление решения (7), которое в итоге отображается в интерфейсе пользователю (8-9).

Рассмотрим более детально взаимодействие программного комплекса и графического редактора. Вычислительной программой генерируется по два файла для каждого из напряжений S_1 , S_2 , S_3 и скоростей V_1 , V_2 для обработки в

среде Gnuplot. Рассмотрим структуру этих файлов на примере напряжения S_I . Первый файл содержит данные, полученные в результате расчетов (рис. 7).

1.123676e-001	1.123787e-001	1.123793e-001	1.123702e-001
1.122856e-001	1.122618e-001	1.122356e-001	1.122069e-001
1.120200e-001	1.119724e-001	1.119206e-001	1.118644e-001
1.115001e-001	1.114067e-001	1.113049e-001	1.111941e-001
1.104803e-001	1.103015e-001	1.101095e-001	1.099043e-001
1.086838e-001	1.084046e-001	1.081159e-001	1.078191e-001
1.062704e-001	1.059607e-001	1.056556e-001	1.053568e-001
1.040172e-001	1.037897e-001	1.035781e-001	1.033830e-001
1.026678e-001	1.025773e-001	1.025041e-001	1.024479e-001
1.024144e-001	1.024558e-001	1.025129e-001	1.025857e-001
1.031858e-001	1.033535e-001	1.035373e-001	1.037372e-001
1.049748e-001	1.052684e-001	1.055766e-001	1.058987e-001
1.076926e-001	1.080816e-001	1.084781e-001	1.088807e-001

Рисунок 7 - Файл «plotS11.dat»

Второй файл содержит набор команд среды Gnuplot, необходимых для построения графика на основании данных первого файла. В нем указаны формат выходного файла, название, диапазон области построения графика, и другие параметры (рис. 8).

```
set terminal jpeg
set palette model HSV defined (0 0 1 1, 1 1 1 1)
set size ratio -1
set xlabel 'x'
set ylabel 'y'
set xrange [0:3.000000e-001]
set yrange [0:3.000000e-001]
set isosamples 120
set grid
unset key
unset surface
set pm3d
set view map
set output 'pS11.jpg'
set title 'S11'
splot 'plotS11.dat' matrix using (0.000391*($1+0.5)):(0.000391*($2+0.5)):3 with lines
```

Рисунок 8 - Файл «plS11»

После того, как оба файла сгенерировались, происходит вызов Gnuplot, который обрабатывает данные, содержащиеся в файлах с результатами расчетов

и на их основании создает графический файл (*.jpeg), который затем передается в интерфейс. Данный подход позволяет визуализировать результаты расчетов в автоматическом режиме, избегая необходимости ручной обработки графических файлов.

Пример вывода результатов расчета в интерфейс представлен в Приложении В.

В общем случае механизм работы программного комплекса можно отобразить при помощи следующей схемы (рис. 9):

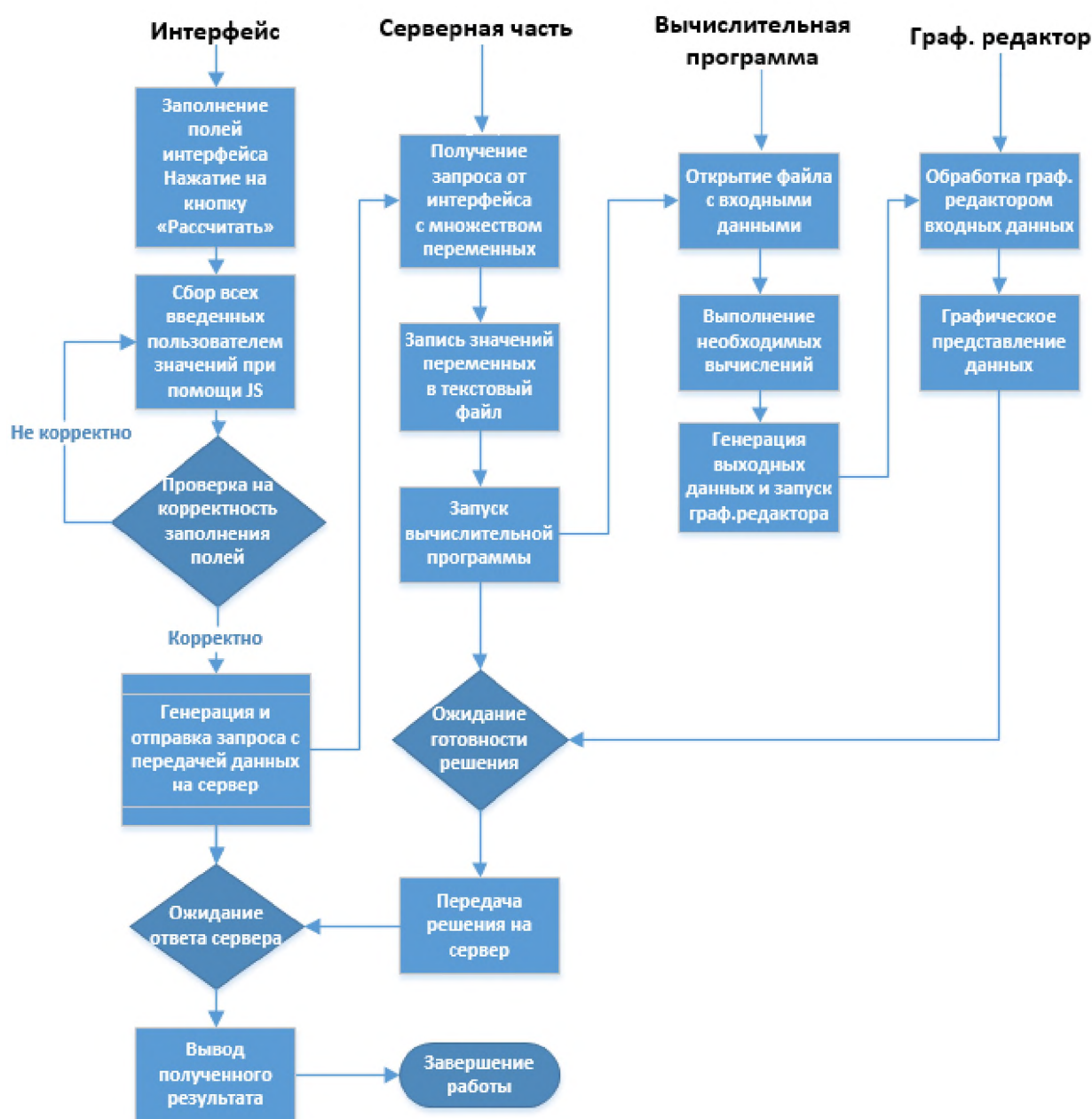


Рисунок 9 - Блок-схема работы программного комплекса

4. Численные расчеты

Созданные программы применялись для решения задач о распространении волн в блочной среде под воздействием различных нагрузок. Расчеты проводились при следующих параметрах материалов: $\rho = 2620$ кг/м³, $c_p = 3500$ м/с, $c_s = 1900$ м/с (горная порода); $\rho_0 = 1990$ кг/м³, $c_{p0} = 1500$ м/с, $c_{s0} = 750$ м/с (грунт). Размер области составляет 0.1 м в каждом направлении.

Краевые условия для расчета задач: $N_{imp} = 1$, $t_{imp} = 15$ мкс, $Sh = 1$ МПа.

На рис. 10 приведено численное решение задачи о действии распределенной Λ -образной нагрузки нормального напряжения в центре нижней границы области в однородной среде (без прослоек). Проведено 200 шагов по времени. Размерность сетки составила 256×256 ячеек в блоке.

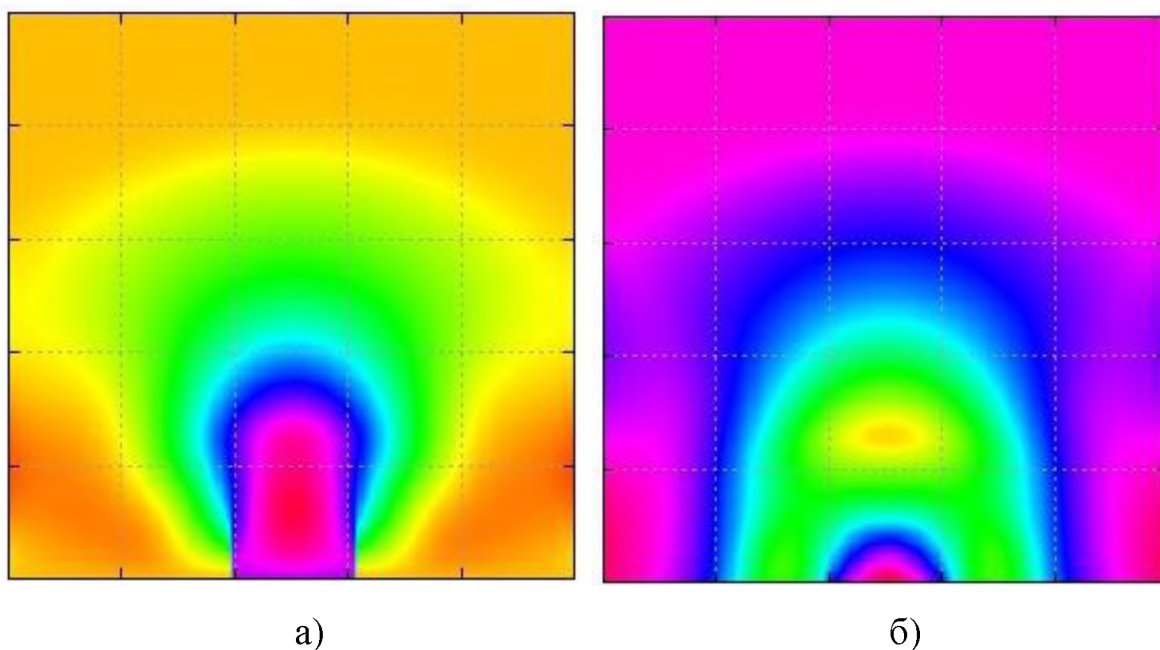


Рисунок 10 - Линии уровня нормального напряжения. а: σ_{22} , б: V_2

На рис. 11 представлено численное решение задачи о действии периодической нагрузки нормального напряжения в центре левой границы области в однородной среде. Было также проведено 200 шагов по времени, размерность сетки составила 256×256 ячеек в блоке.

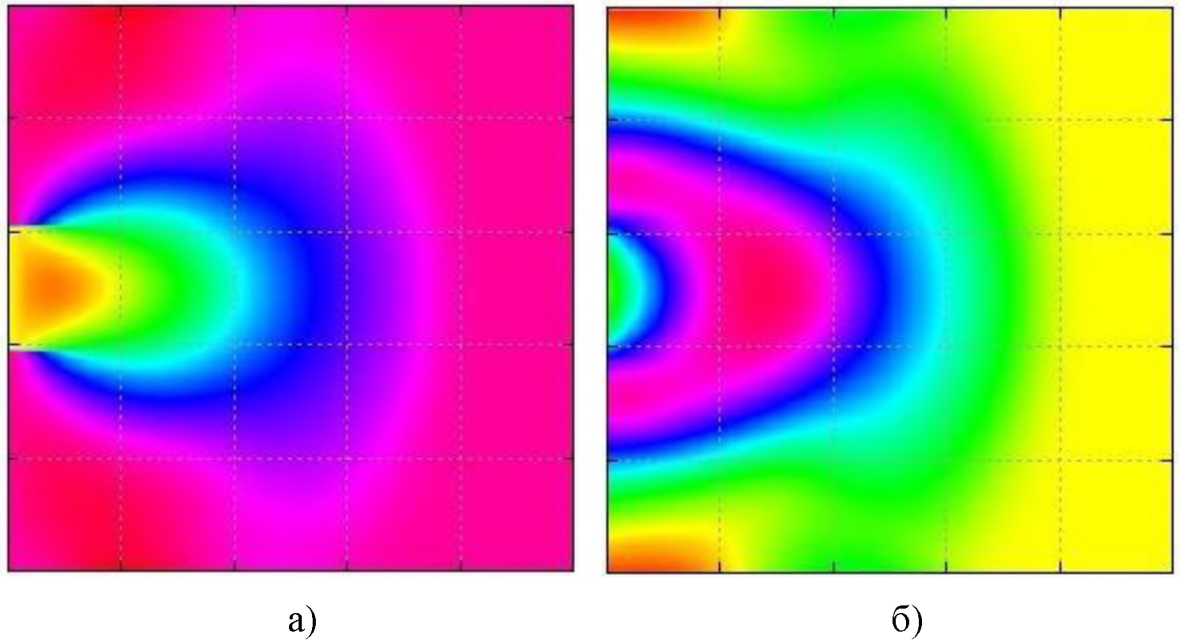


Рисунок 11 - Линии уровня нормального напряжения. а: σ_{11} , б: V_1

На рис. 12 приведен результат решения задачи о действии распределенной П-образной нагрузки нормального напряжения в центре левой границы области. Область состоит из 3×2 блоков, соединенных тонкими прослойками по горизонтали и вертикали соответственно. Проведено 300 шагов по времени. Размерность сетки составила 256×256 ячеек в блоке.

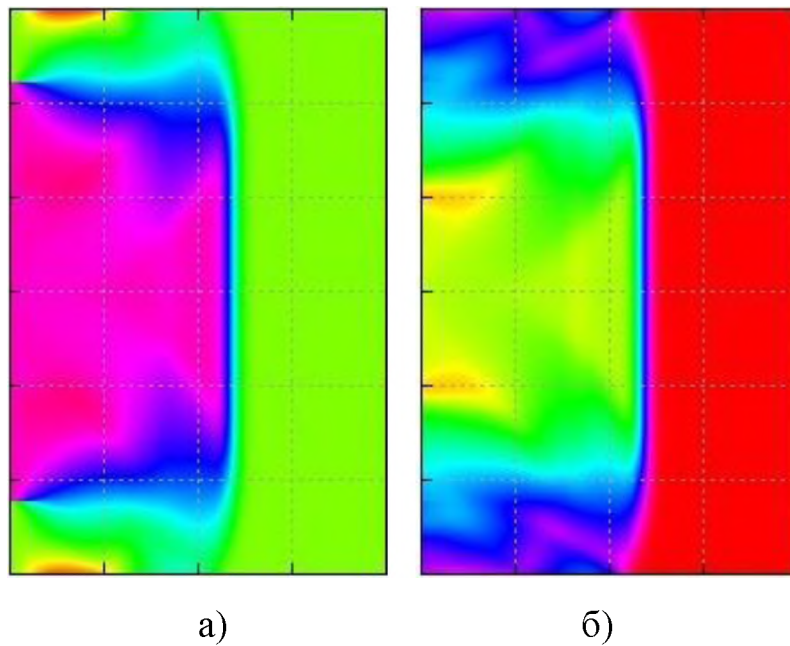


Рисунок 12 - Линии уровня нормального напряжения. а: σ_{11} , б: V_1

На рис. 13 изображен результат решения двумерной задачи Лэмба о мгновенном действии сосредоточенной силы в однородной среде.

В центре левой границы расчетной области действует нормальное напряжение. Можно увидеть, что в однородной среде без прослоек нет отражений волн.

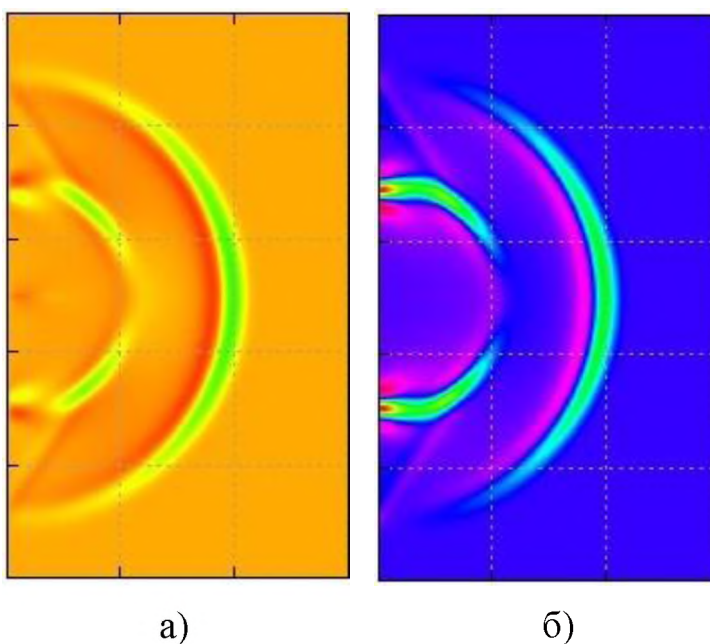


Рисунок 13 - Линии уровня нормального напряжения. а: σ_{11} , б: v_1

Результат решения двумерной задачи Лэмба о мгновенном действии сосредоточенной силы на поверхности полупространства при плоской деформации в блочной среде представлены на рис. 14. В центре левой границы расчетной области действует касательное напряжение. Область состоит из 5×3 блоков, соединенных тонкими прослойками по горизонтали и вертикали соответственно. Проведено 450 шагов по времени. Размерность сетки 1280×768 ячеек в блоке.

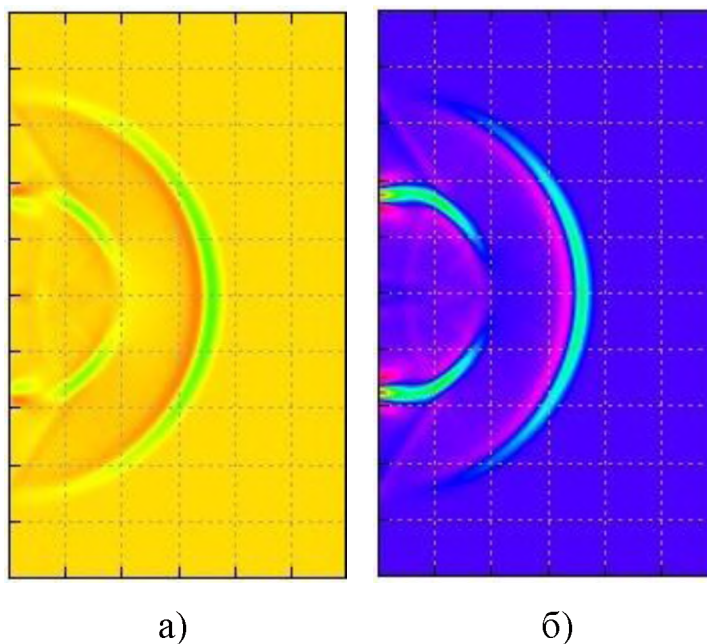


Рисунок 14 - Линии уровня нормального напряжения. а: σ_{11} , б: v_1

На линиях уровня скорости прослеживаются волны, характерные для решения задачи Лэмба в рамках теории упругости: падающие продольная и поперечная волны с круговыми фронтами, две головные поперечные волны в виде симметричных отрезков прямых, касающихся полуокружности меньшего радиуса.

Волновая картина среды, составленной из блоков с тонкими прослойками, отличается от однородной среды многократным отражением волн. При большом количестве прослоек возникает колебательный характер решения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе получены следующие результаты:

1. исследована математическая модель двумерных уравнений теории упругости блочной структуры среды;
2. построен алгоритм решения двумерной задачи, основанный на методе двуциклического расщепления в сочетании с монотонным методом Годунова;
3. реализованы вычислительные алгоритмы для решения поставленной задачи;
4. изучены средства и методы реализации пользовательских интерфейсов;
5. создан графический интерфейс для вычислительной программы;
6. обеспечено взаимодействие программы и интерфейса;
7. проведены численные расчеты.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Варыгина, М.П. Вычислительные алгоритмы для анализа упругих волн в блочных средах с тонкими прослойками / М.П. Варыгина, М.А. Похабова, О.В. Садовская, В.М. Садовский // Вычислительные методы и программирование / НИВЦ МГУ. – Москва, 2011. – Т. 12. – С. 435–442.
2. Глушаков, С.В. Язык программирования C++ / С.В. Глушаков, А.В. Коваль, С.В. Смирнов. – М.: АСТ, 2001. – 500 с. Учебный курс.
3. Годунов, С. К. Численное решение многомерных задач газовой динамики / С. К. Годунов. – М.: Наука, 1976. – 400 с.
4. Коггзолл, Д. PHP 5. Полное руководство / Д. Коггзолл – 2006.
5. Кожемякин, А.Ю. HTML и CSS в примерах. Создание Web-страниц – 2004.
6. Куликовский, А.Г. Математические вопросы численного решения гиперболических систем уравнений / А.Г. Куликовский, Н.В. Погорелов, А.Ю. Семенов. – М.: Физматлит, 2001.
7. Магомедов, К. М. Сеточно-характеристические численные методы / К. М. Магомедов, А. С. Холодов. – М.: Наука, 1988.
8. Марчук, Г.И. Методы расщепления / Г.И. Марчук. – М.: Наука, 1988.
9. Мейз, Дж. Теория и задачи механики сплошных сред / Дж. Мейз. – М.: Мир, 1974.
10. Николас, З. JavaScript для профессиональных веб-разработчиков. Пер. с англ. А. Лютича. – 3-е издание. – СПб.: Питер, 2015. – 960 с.
11. Скотт, Б. Проектирование веб-интерфейсов / Б. Скотт, Т. Нейл. – 2010.
12. Шнейвайс, А.Б. Азы GNUPLOTa: учебно-методическое пособие / А.Б. Шнейвайс, 2016. – 58 с.
13. November 2015 Web Server Survey [Электронный ресурс]: Netcraft// web-server-survey – Режим доступа:
<http://news.netcraft.com/archives/category/web-server-survey/> 12

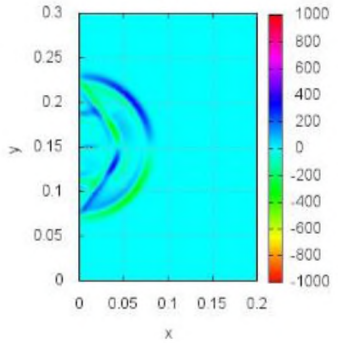
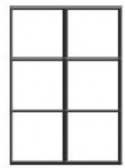
ПРИЛОЖЕНИЕ А

Описание переменных

Nt – число шагов по времени;
 $Nl1$ – количество блоков по x ;
 $Nl2$ – количество блоков по y ;
 Nx – размерность пространства по x ;
 Ny – размерность пространства по y ;
 lx – длина блока;
 ly – ширина блока;
 $bound$ – тип граничных условий;
 $load$ – тип нагрузки;
 N_imp – число импульсов;
 t_imp – длительность импульса;
 t_noimp – интервал между импульсами;
 Sn – величина амплитуды нагрузки;
 ro – плотность основного слоя;
 cp – продольная скорость в основном слое;
 cs – поперечная скорость в основном слое;
 ro_0 – плотность прослойки;
 cp_0 – продольная скорость в прослойке;
 cs_0 – поперечная скорость в прослойке;
 xs – нижняя граница приложения нагрузки;
 xb – верхняя граница приложения нагрузки;
 pK – параметр Куранта;
 flx – расщепление по x ;
 fly – расщепление по y .

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Вывод в интерфейс результата расчета задачи

Основные параметры Количество блоков по "x" <input type="text" value="2"/> Количество блоков по "y" <input type="text" value="3"/> Размерность пространства по "x" <input type="text" value="256"/> Размерность пространства по "y" <input type="text" value="256"/> Число шагов по времени <input type="text" value="200"/> Длина блока <input type="text" value="0.100000000000"/> Ширина блока <input type="text" value="0.100000000000"/> Параметр Куранта <input type="text" value="1"/> <input type="button" value="Нарисовать область"/>	Начальные условия при $t = $ <input type="text" value="0"/> σ_{11} <input type="text" value="0"/> σ_{22} <input type="text" value="0"/> σ_{12} <input type="text" value="0"/> v_1 <input type="text" value="0"/> v_2 <input type="text" value="0"/> Краевые условия Тип граничных условий: <input type="radio"/> Lambda-impulse <input type="radio"/> Pi-impulse <input type="radio"/> Sin <input checked="" type="radio"/> Lamb Число импульсов <input type="text" value="1"/> Длительность импульса <input type="text" value="1.5e-5"/>	Параметры материала Основной: Плотность <input type="text" value="2820"/> Продольная скорость <input type="text" value="3500"/> Поперечная скорость <input type="text" value="1900"/> Прослойка: Плотность <input type="text" value="1990"/> Продольная скорость <input type="text" value="1500"/> Поперечная скорость <input type="text" value="750"/>	
	<input type="button" value="Задать граничные условия"/>		Результат расчета <input type="button" value="V1"/> <input type="button" value="V2"/> <input type="button" value="S11"/> <input type="button" value="S12"/> <input type="button" value="S22"/> <div style="text-align: center;"> <p>S11</p>  </div>
<input type="button" value="Задать граничные условия"/> <input type="radio"/> Скорость v_1 <input checked="" type="radio"/> Напряжение <input type="radio"/> σ_{11} <input type="radio"/> σ_{12} Амплитуда <input type="text" value="1.e1"/> Нижняя граница приложения нагрузки <input type="text" value="384"/> Верхняя граница приложения нагрузки <input type="text" value="384"/>		<input type="button" value="Задать граничные условия"/>	
	<input type="button" value="Задать граничные условия"/>		